自律分散ロボットシステムと群知能

ジェラルド ペニ*

1. 研究分野

自律分散ロボットシステム (DRS: Distributed Robotic Systems) は、 N 個のロボットユニットから構成されて、分散的に、すなわち中央制御方式を用いずに非同期的に有用な作業を行うシステムである。このシステムは、 N がクリティカルナンバー $N_c (>1)$ より大きい場合にのみ動作する。ところで、個々のロボットユニットはそれ自身では有用な作業を実行することができない。それは、DRS の定義によれば個々のロボットユニットは知能を持っていないので、‘知能’を必要とするような作業を行なうことができないのである。‘知能’は DRS 全体の特性であり、ロボットユニットの数 N がクリティカルナンバー N_c を越えるときしか現われない。これは、群知能 (Swarm Intelligence) の基本的な特性である。

DRS や群知能に関する研究が、たとえ Von Neumann によって提案されたセルラーモデル¹⁾があったにしても、注目され初めたのは、ここ 10 年以内のことである。この分野は現在研究が進行中であり、DRS や群知能に関する‘教科書’などは一冊も出ていない。DRS や群知能に関する最近の研究の動向は、四つの論文に述べられている^{2)~5)}。ここでは、四つの論文^{2)~5)}で討論されている概念と事実、又は最近の幾つかの論文に述べられている内容から、DRS や群知能の基本概念などについて解説する。

最初に、DRS や群知能に関する研究を、従来のマルチロボットシステムに関する研究 (例えば、マルチマニピュレータに関する研究) などから区別する必要がある。DRS や群知能とマルチロボットシステムの研究は、同様に単一のロボットが実行できない作業を行なわせるためのものである。DRS や群知能とマルチロボットシステムの違いは、複数のユニットに協調作業を行なわせることではなく、DRS や群知能を構成する個々のユニットが自分自身で作業を行なえないのに対し、マルチロボ

ットシステムでは個々のユニットが作業を行なうことができる点にある。マルチロボットエージェントは、社会に生活している高級動物集合 (例えば、人の集合など) に似ている。一方 DRS や群知能は、生体細胞の集合に近く、個々の細胞は他の細胞の協力なしには有用な仕事を実行することができない。

DRS や群知能の第二の特徴は、分散的に作業を行なうことである。なぜ中央制御方式でなく分散制御方式が良いかという点、中央制御方式 (例えば、階層型制御方式など) の場合には常に以下のようなリスクがある。

- (a) リーダとスレーブ間の通信が狭い所に集中することによる障害、
- (b) リーダの過失による信頼性の低下、
- (c) 構造の複雑性—単純で同様な要素での構成は除外される—と、低い再構築性。

2. 物理的実現性 (人工的と生物的)

参考文献²⁾では、様々の DRS や群知能に関する実際的な問題が具体的なハードウェアの実現性を基に、討論されている。1987 年に初めて提案されたシステムは CELLular roBOT の頭文字を取って CEBOT と呼ばれている。‘cellular’という用語は、生物細胞を参照して用いられている。そして、CEBOT を構成する個々のロボットユニットを生物細胞のように自己組織化することが試みられている。その目的は動的再構成ロボットシステム、すなわち環境の変化に応じて再構築することができるロボットシステムを実現することである。この根拠は従来のロボットシステムは、環境の変化に対応することや、タンクなどのような小さな入り口を持つ閉空間に入れることもできず、しかも、ロボットシステムが要素部品に分割、輸送されて、閉空間の中で再び組み立てられることもできないというところにある。

個々のロボットユニットは、各々 CPU、プロトコル及びセンサなどを有している。その内、例としての曲げ関節、回転関節、エンドエフェクタ及び移動機能を有する幾つかのロボットが実現されている。さらに結合セル、動力セル及びその他のセルなども存在する。生物組織に

原稿受付 1992 年 7 月 16 日

Distributed Robotic Systems and Swarm Intelligence

* カリフォルニア大学リバーサイド校電気工学科教授

おけるように、ここでの目的は、基本ユニット（生物細胞に類似）やモジュール（生物組織に類似）及び以上に述べられた基本要素から構造（生物器官に類似）を構成することである。

ここ5年の間に、移動セルを機械的に実現する困難さを解決し、結合、分離ユニット（接近、結合を含む）において、大きな進歩があった。それ故、ユニット間の自律的な結合が達成されている。障害物回避、タスクプランニング、最適再構成のためのアルゴリズムにおいても、局所的及び広域的に効率的な通信と同じように大きな前進がもたらされた⁷⁾。

CEBOT に関する研究では、DRS システムのハードウェアの実現における三つの重要な困難な点が述べられている。

- (1) 機械的（一般的には、ハードウェア）な実現、
- (2) アルゴリズムの構築、
- (3) 通信の問題。

通信は、DRS や群知能を実現するための基本的な問題である。それは、1台の複雑なロボットから多数の単純なロボットユニットに分解する過程の中で、各ユニットの単純さとユニット間の通信の複雑さの間に常にトレードオフが存在するからである。

通信は、ACTRESS⁸⁾ プロジェクトの重要な要素である。この ACTRESS プロジェクトでは、最近5年間に、複数の移動ロボットを有する DRS が開発された。1989年に提案されたそのシステムは、“ACTor-based Robot and Equipment's Synthetic System”の頭文字を取って ACTRESS と呼ばれている。ACTRESS は、種々のタイプのロボットユニット（自律ロボット、計算機及びその他の機器）及び通信ネットワークから構成されている。その目的は、作業を行なう時に協調的な有効手段を有する自律移動ロボット群を実現することである。多くの有用な作業は1台のロボットでは実行することができない。その理由は実行される有用な作業が1台のロボットで提供できる実行手段より多く要求されるからである。その実現に向けての進歩は、衝突回避のためのセンサ及びワイヤレスモデムによる通信システムを有する3輪操舵自律ロボットを実現させた。衝突回避とパスプランニングのためのアルゴリズムは分散化作業計画手法によって構築された。

協調する自律ロボットの通信の重要性を強調する一方、ACTRESS プロジェクトは DRS のもう一つの重要な特性を示している。その特性とは、ACTRESS が作業を実行するに当たって、最近、研究されている中央制御方式を用いるマルチエージェントロボットシステムとは異なり、分散的に作業を行なうことにある。例^{10),11)}を参照

されたい。

参考文献⁹⁾では、組織化ロボットを有用にかつ知的に動作させるために、従来のロボット/AI 手法と異なる新しい考え方が提案されている。その考え方とは、内部表現なしの知能というそれである。新しい手法においては、個々のロボットユニットが、1986年に初めて提案された‘包含アーキテクチャ’ (subsumption architecture) に基づく一種の‘反射挙動’ (reflex behavior) を行なう¹²⁾。

従来のロボット/AI 手法では、各々のロボットユニットは次に示す順番で情報を処理する。(1) 知覚、(2) 思考（理解、すなわち内部モデル中における認識と分類及び決定）、(3) 行動。この順番は勿論、人間における場合と同様である。この新しい手法では、ステップ(2)は個々のロボットの反応というメニューから選択された‘反射’ (reflex) によって置き換えられる。知的決定に到達する内部モデルや知識表現が存在しない。この考え方では、個々のロボットユニットは知的ではなく条件反射の下での低級動物に類似した行動を行なう。

第1の目的は、ロボットのために特別に作られた訳ではない環境で作業を行なうことができるロボットシステムを構築することである。第2の目的は、グループとしてある有用な作業を実行できるようなそれぞれのユニットの反射挙動を設計することである。知的挙動の能力を有するロボットを作り上げるためにモデル規範型ロボット/AI の研究が20年前から始められたが、現在、満足できる結果は一つも得られていない。そこで、反射挙動を有するロボットの研究が進められている。

この実現に当たって、このグループが強調したのはハードウェア的な実現（シミュレーション研究は価値が乏しいとみなされた）であり、幾つかの違った型の反射挙動ロボットユニットが実現された。単純で局所的な相互作用を経由して、そして手の込んだアルゴリズムを用いることなしにある程度の協調性もまた実現された。

‘反射挙動’型ロボットユニットに関する研究は、DRS/群知能の研究と社会的な昆虫のような低級動物の社会に関する研究との類似性を説明している。社会的な昆虫に関する研究（文献⁴⁾で参照されている）において、内部モデルや表現によらない非常に単純で局所的な相互作用が、非常に複雑でそしてある意味で知的で大局的な行動をいかにして生成するかが明らかになっている。

1959年初期に先駆者¹³⁾はいたが、1987年ごろ（参考文献^{14),15)}を参照）蟻社会の自己組織化に対する注目によって、単純な自動接触（すなわちポジティブフィードバック）的な反応行動が、餌を摂取したり、穴を掘ったり、巣を作ったりするような、昆虫社会の複雑な知的行動を説明することができる可能性が示された。昆虫社会

中での通信メカニズムは、昆虫間の直接接触あるいは環境の中で化学物質を置いたり検知したりすることに基づくトークンパッシング法 (token-passing) のように非常に単純である。この単純なモデルを用いて、非常に複雑な知的な行動が説明されている¹⁶⁾。

単純で局所的な相互作用を加えられた反射挙動のモデル (内部モデルあるいは知識表現のない) は、(1) すべての相互作用を取り除く¹⁷⁾ ことによって、あるいは (2) ‘反射挙動’ を、単純な ‘物理反応’ に変えることによって、より一層発展しうる。結果として、物理学の多体モデルに類似したモデルが研究された。このような研究は、物理や化学で研究されている周知の自己組織化問題と同一になる¹⁸⁾。しかし、それはこの論文で取り扱う範囲外である。

3. 何が重要か

何が重要かの観点から、二つの疑問点がある。

(1) ハードウェアと局所的な通信/相互作用規則の構築が、DRS/群知能の研究において、なすべき事柄であるか？

(2) 群知能とは、反射挙動型のエージェントの群れによっておそらくは提示されたであろう知能以外の何物でもないか？ すなわち、‘表現なしの知能’ であるか？

先ず疑問 (1) について考えてみよう。疑問 (2) については第 5 章で説明を行なう。

参考文献⁵⁾において、第 2 章で概説された DRS/群知能の研究が直面している事柄の評価が行なわれた。その結論は以下のものである：最も緊急な問題は実際の DRS のためのハードウェアの工学である (そうでなければ適切でないシステムに関して多くのモデル化やシミュレーションがなされるであろう)。しかし、最も基本的な問題は DRS に有用な何かを実行させるためのアルゴリズムの構築である。

この結論を導いた理由は簡単である：最も複雑なセンサとアクチュエータを有するロボットユニットが手にはいると仮定しよう。各ユニットがそれ自身で有用な何かをするための十分な知能をもっていないならば、それらに協調に関する有用な何かをさせるためのプログラミングができるものがあるであろうか？ その答えは “NO” である。実際にそのようなユニットは既に存在している：それらは例えば精神的ハンディキャップを負った人々である。彼らは確かに反射行動を行うように訓練され得るし、お互いに通信を行うためのコンピュータを装備してもらうこともできる。しかし、(コンピュータを装備された) 精神的ハンディキャップを負った人々のグループを、有用な協調作業を行うことが可能な知的システ

ムにする方法を誰も発見していない。その理由はハードウェアではなく、アルゴリズムにある。

4. アルゴリズム

DRS のためのアルゴリズムは、最初にセルラーロボットシステム (CRS) に関する論文の中¹⁹⁾で述べられている。CRS というのは、それら自身の上にパターンを発生させる目的をもって離散的な (セル状の) 空間で非同期に作動するロボットユニットからなる、DRS の一つの特異な形式である。CRS は遺伝物質に類似し、それら自身によって生成されるパターンのように、情報をエンコーディングすることができる。CRS をセルラーオートマトン (CA) から区別するための二つの特徴は以下のようである。

(1) 非同期性、

(2) (ユニットの数またはその他の性質の) 保存性。

この二つの特徴はより一般的な意味で、DRS の特徴でもある。

CRS のアルゴリズムを構築するために、Wang²⁰⁾ 他は、分散コンピューティングの分野で開発されたアルゴリズムを CRS に導入し、その後不連続な DRS に導入することを試みた。この離散性は人為的に見えるかも知れない。しかし、ロボットは究極的には連続空間で作動するのではあるが、多くのロボットのアプリケーションはロボットが本来的に離散的である物理的もしくは論理的な実体を操作するよう要求するのである。

実際に、DRS は、操作する場が物理的に離散的なアプリケーション、例えば、工場の床面、分割された鉄道システム、部屋や廊下などを有する建物などに関してしばしば考えられている。これらの環境下における移動ロボットのためのプランニングや制御は、離散的な物理的空間の扱い方と (おそらくは) 有限の容量である共用資源の扱い方も提案している。

分散ロボットシステムにおける共用資源は物理的にも論理的にもなりうる。例えば、 M 台のロボットが従事する必要のある事象が生じ、 $N \geq M$ 台のロボットがシステムに存在しているとする。ここでの疑問点はこの N (の中の M) 台のロボットが作業を行わなければならないかと言うことである。もしもプランニングが前もって行われる (これは常に可能というわけではない) ことがなく、そしてもし集中制御方式が手に入らないならば、参加の権利は離散的に、かつ、有限な容量 M の共用資源として、取り扱わなければならない^{(21),(22)}。

相互排除、デッドロックの発見と解消などのような共用資源を操作する分散プロトコル (protocol) が、コンピュータ科学者によって広く認識され、研究されている。

その原理は全ての複合エージェントシステム (multiple agent systems) に用いられる。勿論 DRS も含まれている。実際に参考文献²¹⁾で指摘されているように、これらの問題の分散的かつ非同期的な性質は、それが一般に実現されるよりも一層複雑で難解になっている。

多数のロボットが共用資源を競っているシナリオについて考えてみよう。常識的には、最初に来たものが最初に従事する (First-Comes-First-Served : FCFS) という解が考えられる。非同期性、これは思考/処理の中断の可能性、及び/又は、センシング/通信の比較的重要な遅れを意味するが、これはしばしば矛盾した結果を生ずることがあり、時には、どのロボットがその場面に最初に到着し資源を要求しようとも、それらの間に矛盾した視点を与えることがある。たとえ、実際に、絶対時間で最初に到着したロボットがいるとしてもである。このような事態は実際にも起こりうることで、その問題はそれゆえ人為的なものではないのである。また、そのような問題を、文献²³⁾で主張しているようなランダムな反射反応を用いて解決することも、また必ずしも可能ではない。そのようなランダムな反応は、(イーサネット通信で起きるような) 情報の衝突のような場合には適当ではあるが、しかし多忙な空港に着陸しようとしている航空機のように、実際に多数のエージェントが物理的な衝突の危険に晒されている場合には適用できない。

このような問題を解決するために、幾つかの数学的に証明できるプロトコル (分散アルゴリズム) が分散ロボットシステム^{20)~22), 24), 25)} に対して共用資源を取り扱うために提案されている。最近、デッドロック発見及び分散アルゴリズムなどの新しい手法が油田らによって製作されたロボットシステム²⁶⁾に対して提案されている²⁴⁾。

この章の主要な点に戻って、アルゴリズムの研究が DRS/群知能の進歩にとって基本的であるということについて述べる。

5. DRS 設計のための一般的手法

上述の結果から、個々の問題が提出され解決されたが、DRS の設計、製作のための基準の一般式については、なお初期の段階にある。最近、この分野で成果が挙げられている。

DRS と群知能の概念が群れの設計と製作のために一層正確に定義された²⁷⁾。ある作業が与えられると、群れの設計に向けての最初の基本的な段階は、群れを構成する個々のユニットが実行できるように、与えられた作業を、下位の作業形態、つまりサブタスクに分解することである。同期して実行可能な作業として、細分化できなければ、その分解は能率を上げることができない (設計

を失敗させる) ということが述べられた²⁷⁾。同期的に実行可能な形に分解できた作業は *synextask* と呼ばれた。

DRS では、*synextask* は非同期的に実行される。これは DRS 問題の本質である。

(少なくとも) システムの一つの量、例えば、必ずしも必要ではないが、それらのユニットの数、を作業の実行中に保存する時、DRS は自己組織化する。そのような DRS は群れと呼ばれる。このように、作業を実行した外面的な結果がどんなものであろうとも、群れは固定された数の状態 (DRS ユニットの初期状態と最終状態の集合) の中で非同期的に再配分されるユニットのシステムとして記述される。これは、たとえ群知能²⁸⁾という述語が現在は異なった意味で用いられるにしても、群問題の本質である²⁷⁾。

5.1 群知能と‘表現なしの知能’

反射挙動のロボットエージェント群のような‘表現なしの知能’を群知能と呼ぶ傾向がある。しかし、この概念はわれわれの主張に限定し過ぎる。非常に挑戦的な問題を構成するためには、本解説の冒頭で定義されたように、DRS/群知能について設定すれば十分である。作業を個々には実行することができないユニットの非同期的協調は、問題を構成するにたるものに必要な唯一の仕様である。このように、例えば、(知識表現と内部モデルを有する) 分散 AI システムは群知能問題に含まれる。特別なタイプの反射挙動に分野を限定する必要はない。

次に述べる理由により、一般的な定義は保持する価値がある。

(1) そのように一般性をもってしても、有用な何かを行なうための非常に一般的に定義された群れを誰も作り出せなかったという事実がある。

(2) より深いレベルで、文献で議論されているように²⁸⁾、群知能はその挙動の不可予測性を有している。

5.2 均一な環式群

個々のユニットが全く同一であるような群れ (すなわち、‘均一な’群) には大きな関心がある。均一な群は工学において重要である。その理由は、多数の同一のロボットを製造することは一般には異なったユニットを作るより簡単だからである。均一な群れには、また、多数の社会的な昆虫を機能的に同一の個体⁴⁾の群れを構成するので、生物学的に関心がある。

文献²⁷⁾に示されているように、もしタスクを同期的に実行する必要がある (すなわち、*synextask* の実行)、効率的な均一な群れは、群れが実行すべき n 個のサブタスクのうちどれをも、それらのユニットのそれぞれが、非同期に実行できなければならないという顕著な特性を持たねばならない。そのような能力は個々のユニットが

同期的に全てのサブタスクを実行できなければならないということの意味するものではない。しかし、同時にサブタスクの一つだけは実行できなければならない。均一な群れを構成する個々のユニットは同一の個体を構成する異なった生物細胞に類似している。各細胞が同一の DNA を含む限り各細胞が結局限定したサブタスクを優先的に実行することができる。

均一な群れは、またセルラーオートマトン (CA) の非常に特殊の場合として関係付けることができる。それらの特性は、非同期的であり (典型的に CA が同期して動作するのに対して)、保存的な性質 (一般に CA はいかなる性質をも保存しないのに対して) である。

非同特性及び保存性に加えて、群れは附加的な特性 (周期性) を持つことが限定される。環式群は均一な群れである。その個々のユニットが周期的な順番かシーケンスで状態を切り替えられる特性によって特徴づけられる均一な群れである。すなわち周期的なシーケンスは、 $(1, 2), (2, 3), \dots, (k, k+1), \dots, (M-1, M), (M, 1)$, である。ここで、 M が状態の数を示す ($2 \leq M \leq 2N$, N は synextask が分割されたサブタスクの数である)。

環式群は CRS²⁹⁾ の特別な場合として、または検出器群の構成など^{30), 31)}が研究されている。環式群が synextask を非同期的に実行する際に「最も簡単」な構造をしていると推測されている²⁷⁾。この提案の妥当性は、個々のユニット間の単一方向の通信における最小の冗長性に基づいている。個々のユニット間の衝突や競争が起こることはない。

5.3 DRS 作業設計と実行のための数学モデル

最近まで、群と分散システムの特殊機能、特にそれらのための自己組織化を表現する、分配法に基づく数学モデルが開発されていない。参考文献³²⁾において、一つの新しい手法が提案されている。

一般に、群問題が数学的に、 N 個のユニットを M 状態に非同期的に再分配する問題に帰着できる。

従って、一つの群れが自己組織化したり作業を行ったりするため、以下に示す三つの動作を行わなければならない。

A1) 最終状態 $\{N_k\}$ を知る。すなわち、個々のユニット $N_k (k=1, 2, \dots, M)$ の数を知る。

A2) 現在の状態 $\{L_k\}$ と最終状態 $\{N_k\}$ との相違すなわち、 $\{N_k - L_k\}$ を検出する。

A3) $L_k > N_k$ となるまで、その状態のユニットの数を変化させる (ここで常に $N = \sum N_k$ を保持する)

A1 と A2 は、全体として、群れの設計者にとって概念的には本質であることは明白である。しかし、これら

は群れのユニットにとっては本質ではない。理想的には、A3 だけを基に自己組織化することによって、作業を行う群れが実現されることが望ましい。このような群れのユニットにとって、常に最終分配の状態 $\{N_k\}$ は未知である (最終状態に到達する時、最終状態での分配数がわかる可能性がある)。それと知らずに外部作業を実行できる (最終分配数に到達できる) 群れは、明らかに、プライバシーや安全性が本質となる様なアプリケーションでは役に立つものになるであろう。

5.4 差分方程式の解としての分配数

前述されたように、作業を synextask に分割した後、群問題は数学的に、 M 状態全体にわたって分配数 $\{L_k; k=1, 2, \dots, M\}$ を、改めて非同期的かつ保存的に分配することによって、ある必要な最終分配数 $\{N_k\}$ に到達する問題に帰着することができる。ここでは、 $\sum L_k = \sum N_k = N$ 。

参考文献^{29), 30)}では、群れの M 台のユニットに $\{N_k\}$ の M 数を直接書き込むことによって、以上に述べられた作業が行なわれている。その新しい手法は、差分方程式の解である分配数を生成することを試みることである。

差分方程式の解の有効点は以下のようである：

1) あらゆるサイト (site) は、差分方程式の解を得るために、同様に「操作」される (境界サイトを除外する)。

2) あらゆるサイトは、差分方程式の解に含まれる情報 (あるいはその欠落) に対して、同一である。

通信の範囲を制限するために、分配数を低次元の差分方程式の解として生み出すことは重要である。

低次元 (2 次) の差分方程式の解とする分配数が与えられる場合には、群問題は、 $\sum L_k = \sum N_k = N$ を満たす一つ任意の初期分配数 $\{L_k\}$ から、非同期的に M 状態を有する群の中で分配数の生成方法に帰着される。

以上に概説した群れの設計手法論を基に、ある一般的な条件を有する線形方程式によって構成されるシステムを、非同期的に解く方法を見つけたことができた³²⁾。

特に、システムが周期的な境界条件を持っている差分方程式を現わす場合に、その解は、円弧上の定常波で表現できる。そこには、正規直交基底の基礎関数として適当に正規化したり、再スケーリングしたりして用いられる多数の関数が存在する。

これらの結果は、差分方程式 (またその他の線形方程式) を解くための新しい手法を用いて、非同期的に解き明かすことによって得られる。その例としては、周期的な境界条件を有する定常波方程式の解がある (環式群の実行で結論される)。さらに一般的な条件の下で証明された収束性は、任意のエントロピーの初期分配から出発

して得られる。

それらの解は、任意の分配を産み出すために直交基底関数として適切な正規化や再スケーリング手法などを用いて使用できる多数の関数（例えば、定常 sinusoidal 波）を構成する。

非同期的に差分方程式を解くことによる環式群の自己組織化の主要な利点は、プロセスの‘プライバシー’にある。個々のユニットは、それらが実現しようとしている分配に‘気づいて’いない。もしも群れが敵に捕われ、またその詳細が調べられるとき、群れが構成しようとする最終分配数が何であったかを、誰によっても発見することができない；当然差分方程式のパラメータ（個々のロボットユニットのプログラムが分析されたならば、それが簡単に分かると思われる）と、群れを構成する個々のユニットの正確な M を知っている人は、群れが構成しようとする最終分配数を一層簡単に決定することができる。しかし、もし群れを構成する幾つかのユニットが逃避したら、その人でも群れの最終分配数を決定することは困難である。

同様な理由で、人は、ただ群れの外側を観察するだけでは、群れがどういう最終分配数に向かっているのかを予測することができない（これは、群れが非同期的でしかもシステムのスナップショットを手に入れることができないからである）。群れが高エントロピーを有するもの（無秩序）から低エントロピーを有するもの（秩序）を生成することができるので（群れは基本的には Maxwell の悪魔である）、そのシステムは、多数のユニットによって‘ありそうもないことを期せずして創造できる’という、群知能の独自の性質のシーズを提示する。

謝辞

この解説をまとめるに当たって、Dr. Susan Hackwood と Dr. Jing Wang から様々な貴重な意見を頂いた。また日本語への翻訳を手伝って頂いた Dr. Hidemi Hosokai と Dr. Shugen Ma に謝意を表す。

参考文献

- 1) J. Von Neumann "Theory of Self Reproducing Automata", ed. by A. Burks. Urbana: University of Illinois Press, 1966.
- 2) T. Fukuda and Y. Kawauchi, "The Cellular Robotic System (CEBOT), a Self-Organizing System", in Intelligent Robotic Systems, ed. by S. G. Tzafestas. New York: Marcel Dekker, Inc., 1991.
- 3) R. A. Brooks, "New Approaches to Robotics", Science 253, Sep., 1227-1232.
- 4) G. Theraulaz and J. Gervet, "L'intelligence en Essaim dans les colonies d'Insectes et les systemes d'agents artificiels", Psychologie Francaise, special issue on Animal Intelligence (in press).
- 5) G. Beni and J. Wang "Theoretical Problems for the

- Realization of Distributed Robotic Systems", Proc. of the 1991 IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation, Sacramento, Ca, April 1991, pp. 1914-1920.
- 6) T. Fukuda and S. Nakagawa, "Dynamically reconfigurable robotic system" in Proceedings of IECON'87, IEEE Catalogue # CH 2484-4/87, pp. 588-595.
- 7) T. Fukuda, T. Ueyama, Y. Kawauchi, and F. Arai, "Concept of Cellular Robot System (CEBOT) and Basic Strategies for its Realization, in Computers-Elect. Engng Vol. 18, No. 1, pp. 11-39, 1992.
- 8) H. Asama, K. Ozaki, H. Itakura, A. Matsumoto, Y. Ishida and I. Endo, "Collision Avoidance Among Multiple Mobile Robots Based on Rules and Communication", Proceedings of IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems (IROS 91) Nov. 3-5, 1991, Osaka, Japan, pp. 1215-1220.
- 9) H. Asama, A. Matsumoto, and Y. Ishida, "Design of an Autonomous and Distributed Robot System: ACTRESS", in Proceedings of IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems (IROS-89), 1989, pp. 283-290.
- 10) C. Le Pape, "A combination of Decentralized and Distributed Methods for Multi-agent Planning and Scheduling", Proc. Intern. Conf. Robotics and Automation, pp. 488-493, 1990.
- 11) F. R. Noreils, "Integrating Multi Robot Coordination in a Mobile Robot Control System", Proc. IEEE Int. Workshop on Intell. Robots and Systems, pp. 43-49, 1989.
- 12) R. A. Brooks, "A Robust Layered Control System for a Mobile Robot", IEEE J. Rob. Autom. Vol. 2, 1986, pp. 14-23.
- 13) P. P. Grasse, "La reconstruction du nid et les coordinations interindividuelles. La theorie de la stigmergie", Insectes Sociaux, Vol. 6, 1959, pp. 41-84.
- 14) J. M. Pasteels, J. L. Deneubourg and S. Goss, "Self-Organization in Ant Societies (I), in From Individual to Collective Behaviour in Social Insects, ed. by J. M. Pasteels and J. L. Deneubourg, Experientia Supplementum 54, 1987, Basel: Birkhauser Verlag.
- 15) J. L. Deneubourg, S. Goss, J. M. Pasteels, D. Fresneau and J. P. Lachaud, "Self-Organization in Ant Societies (II), in From Individual to Collective Behaviour in Social Insects, ed. by J. M. Pasteels and J. L. Deneubourg, Experientia Supplementum 54, 1987, Basel: Birkhauser Verlag.
- 16) J. L. Deneubourg, G. Theraulaz, and R. Beckers, "Swarm-made Architectures", in Proceed. of First Intl. Conference on Artificial Life, Paris, Dec. 11-13, 1991, pp. 123-133.
- 17) R. C. Arkin, "Cooperation without Communication: Multi-agent Schema Based Robot Navigation", J. Robotic Systems, Vol. 9, 1992, pp. 351-364.
- 18) See e.g. G. Nicolis and I. Prigogine, "Self-Organization in non-equilibrium system", New York: John Wiley, 1977.
- 19) G. Beni. "The Concept of Cellular Robot", Proceed. 3rd IEEE Symposium on Intelligent Control, Arlington, Va., Aug. 1988, pp. 57-61.
- 20) J. Wang and G. Beni, "Distributed Computing Problems in Cellular Robotic Systems", Proceedings

- of IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems (IROS 90), July 3-6, 1990, Tsuchiura, Japan.
- 21) J. Wang, "DRS Primitives Based on Distributed Mutual Exclusion", Proceedings of the 2nd International Conference on Automation, Robotics and Computer Vision, September 15-18, 1992, Singapore.
 - 22) J. Wang, "Distributed Mutual Exclusion Based on Dynamic Costs", Proceedings of the 1992 IEEE International Symposium on Intelligent Control", August 10-13, 1992, Glasgow, UK.
 - 23) R. A. Brooks, "Artificial Life and Real Robots", in Proceed. of First Intl. Conference on Artificial Life, Paris, Dec. 11-13, 1991, pp. 3-10.
 - 24) Jing Wang, "Deadlock Detection and Resolution in Distributed Robotic Systems", Proceedings of the 1992 USA-Japan Symposium on Flexible Automation", July 13-15, 1992, San Francisco, CA.
 - 25) Jing Wang, "Establishing a Globally Consistent Order of Discrete Events in Distributed Robotic Systems", 1st International Symposium on Autonomous Distributed Robotic Systems, September 21-22, RIKEN, Hirosawa, JAPAN.
 - 26) S. Premvuti and S. Yuta, "Consideration on the Cooperation of Multiple Autonomous Mobile Robots", Proceed. 1990 "Japan-USA Symposium on Flexible Automation", Kyoto, Japan, July 9-13, 1990, pp. 59-63.
 - 27) G. Beni and S. Hackwood "Cyclic Swarms" Proc. of the 1992 Japan-USA Symposium on Flexible Automation", San Francisco, CA, July 13-15, 1992.
 - 28) G. Beni and J. Wang, "Swarm Intelligence in Cellular Robotic Systems", Proceed. NATO Advanced Workshop on Robots and Biological Systems, Il Ciocco, Tuscany, Italy (June 26-30, 1989); and Proceed. of the 7th Annual Meeting of the Robotics Society of Japan, Shibaura, Japan (Nov. 2-4, 1989) pp. 425-428.
 - 29) J. Wang and G. Beni "On Cyclic Cellular Robotic Systems" Proceed. 1990 "Japan-USA Symposium on Flexible Automation", Kyoto, Japan, July 9-13, 1990, pp. 1077-1083.
 - 30) G. Beni and S. Hackwood "The maximum entropy principle and sensing in Swarm Intelligence" in Proceed. of First Intl. Conference on Artificial Life, Paris, Dec. 11-13, 1991, pp. 153-160.
 - 31) S. Hackwood and G. Beni "Self-organization of sensors for swarm intelligence" Proc. of the 1992 IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation, Nice, France, May 1992.
 - 32) G. Beni and S. Hackwood, "Stationary Waves in Cyclic Swarms", Proceedings of the 1992 IEEE International Symposium on Intelligent Control", August 10-13, 1992, Glasgow, UK.

ジェラルド ベニ (Gerardo Beni)

1970 年, フィレンツェ (イタリア) 物理学科卒業. 1974 年カリフォルニア大学ロサンゼルス校大学修了, 博士. 1974 年より AT & T ベル研究所で研究員. 1984 年から 1991 年までカリフォルニア大学サンタバーバラ校ロボットシステムセンターの発起人, ディレクター. 専門分野はロボット工学, 分散ロボットシステムおよび群知能の研究. Journal of Robotic Systems の発起人およびエディター, American Physical Society の Fellow 会員, 1991 年よりカリフォルニア大学リバーサイド校電気工学科教授. (日本ロボット学会正会員)